

基于声学成像技术的海底输气管道微泄漏检测安全装置 研究与实验验证

王 猛 (中海油(天津)管道工程技术有限公司, 天津 300452)

摘 要: 为了进行海底输气管道微泄漏的检测, 通过前视声呐的结构设计、电路设计以及软件系统设计, 开展微泄漏高分辨率高清晰度成像技术及算法研究。研制出基于声学成像技术的海底输气管道微泄漏检测装置, 提升海底输气管道安全监测能力。在实验水池环境中, 可以在 3MPa 压力, 泄放口径最小 0.5mm 时能够检测到信号。

关键词: 海底管道; 微泄漏检测; 声学成像; 装置研发

中图分类号: TE973

文献标识码: B

文章编号: 1674-5167 (2025) 013-0140-03

Research and experimental verification of a safety device for detecting micro leaks in underwater gas pipelines based on acoustic imaging technology

WANG Meng (CNOOC (Tianjin) Pipeline Engineering Technology Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In order to detect micro leaks in submarine gas pipelines, high-resolution and high-definition imaging technology and algorithm research on micro leaks were carried out through the structural design, circuit design, and software system design of forward-looking sonar. Develop a micro leak detection device for underwater gas pipelines based on acoustic imaging technology to enhance the safety monitoring capability of underwater gas pipelines. In the experimental water tank environment, signals can be detected at a pressure of 3MPa with a minimum discharge diameter of 0.5mm.

Keywords: submarine pipeline; Micro leak detection; Acoustic imaging; Device development

高频前视声呐具备成像清晰、目标辨识能力强等特点, 是水下观测的重要设备, 能够实现海底管道大范围探测。针对海底输气管道微泄漏情况, 高频前视声呐利用高分辨率高清晰度成像技术, 对海底管道以及微泄漏气泡现象进行清晰成像^[1]。对于复杂海洋环境, 在回波域利用回波与混响、回波与噪声之间统计特性的差异实现回波与干扰分离, 回波域获取管道以及泄漏区域的强度特征。并利用图像域处理方法对微泄漏的可疑区域提取特征, 在图像域提取管道以及泄漏区域的尺度特征、强度特征以及形态特征等, 回波域和图像域的融合处理, 实现多信息融合的海底输气管道微泄漏的自主检测。

1 前视声呐装置设计

1.1 前视声呐装置系统设计

系统由换能器、电子舱、处理机组成, 如图, 其中湿端包括电子舱和换能器, 放置于水下无人平台或搭载水面船, 系统工作时将数据通过网络传输到处理机^[2], 实时处理显示。

发射阵有两个, 一个为垂直相控阵, 另一个为水平弧形阵; 接收阵为水平多波束接收阵。综合考虑指向性和声源级要求, 发射阵和接收阵布局如图 2 所示。

弧形发射阵基元同样采用发射型 P4 陶瓷材料。

由于大半径薄壁圆弧形陶瓷较难一次成型, 所以采用多路陶瓷条在水平方向拼接成弧的设计方案。按工作频率 700kHz、水平方向 64 路基元设计, 每路基元尺寸约为 $5.5(H) \times 1.2(W) \times 1.8(T)$ 。

弧形发射阵基元组结构如下图所示, 图中中间紫色部分为陶瓷条, 蓝色部分为背衬及安装底座。

接收基元采用接收性能较为优异的 P5 陶瓷材料, 并采用机电转换效率较高的纵向振动模式。按工作频率 700kHz、垂直方向 96 路基元设计, 每路基元尺寸约为 $5.5(H) \times 0.9(W) \times 2.2(t)$ 。

1.2 电路系统设计

前视声呐电路系统主要完成的功能包括: 声纳信号发射, 声纳信号接收, 声纳信号采集和预处理以及网络通信^[3]。

电路系统由前放模块、调理模块、信号处理模块、发射模块、电源模块组成, 电子舱板卡排布框图如下。板卡之间通过板对板连接器相连。通过软线实现与外部模块供电、通信等功能。下图是侧视声呐湿端的排列外形图, 和电子舱的安装示意图 1。

其中, 程控增益电路采用的是低功耗、8 通道的 VCA8500 的 VGA 芯片。

信号处理板是基于高速 ADC+FPGA+ARM 架构的

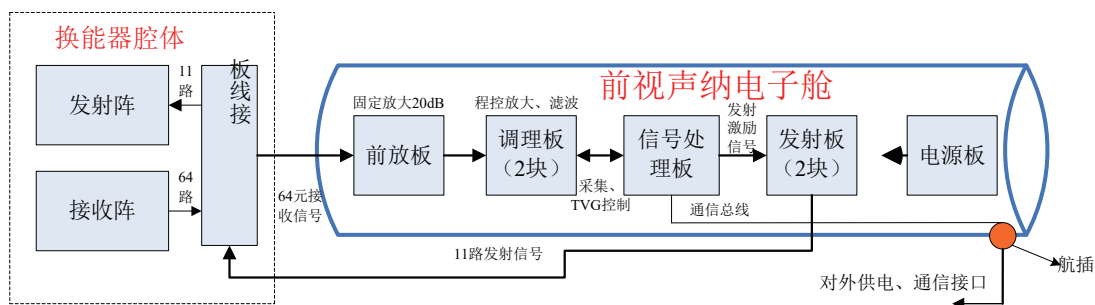


图1 前视声纳电子舱板卡排布框图

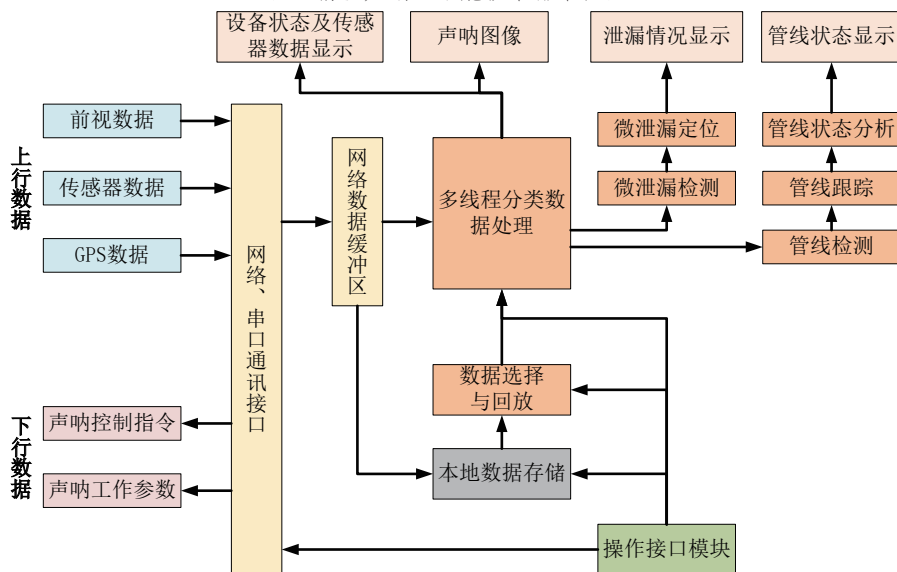


图2 软件工作流程图

通用多通道高速数据采集模块，可以实现1路发射驱动信号的生成、接收机增益曲线控制、1路接收信号的高速采集和处理、大容量数据的本地存储和实时传输、本地存储数据的快速读取、千兆以太网通信等功能。

1.3 检测软件设计

海底输气管道微泄漏检测系统软件，通过网络接收海底输气管道微泄漏检测前视声呐数据，经过算法分析后，显示海底输气管道状态及气体泄漏情况。

海底输气管道微泄漏检测系统软件工作流程图如下图2所示。

软件界面采用多窗口界面风格，窗口布局采用预先设定好的屏幕位置进行布局，软件窗口包括声呐图像窗口、导航窗口、管线及微泄漏检测结果显示窗口、参数设置窗口、状态参数显示窗口、显示设置窗口等。

检测系统软件主要模块有网络模块、文件回放模块、数据处理模块、图像处理模块、声图显示模块、管线检测模块、微泄漏检测模块、管线及微泄漏状态显示模块等。

网络模块包括网络连接的初始化、网络连接、网络接收线程、接收缓冲区的初始化、网络发送、网络

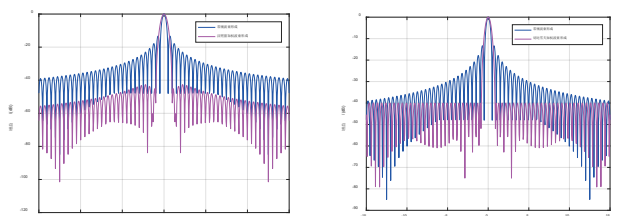
的断开等功能。文件回放模块包括数据文件的打开、数据文件读取线程、文件读取的开始、停止、暂停、加速减速等功能。声呐数据处理模块包括实时工作线程、回放线程、结束线程等线程的创建和初始化，数据包的解析、声呐数据的存储以及界面设置与各线程的交互等功能。图像处理模块封装了波束数据转换、灰度映射、生成位图数据等功能。声图显示模块实现的功能包括调色板的映射、绘制声图、标尺刻度的绘制等。管线检测模块通过分析声呐波束数据检测管线位置，并基于多信息融合处理，实现对管线跟踪和危险状态分析。微泄漏检测模块，通过分析声呐数据检测微泄漏状态是否存在并实现微泄漏位置定位。管线及微泄漏状态显示模块基于AR技术等，在高分辨率高清晰度图像基础上显示检测结果。

2 微泄漏高分辨率高清晰度成像技术

为了获得高分辨率高清晰度成像技术，分别从距离向高分辨率高清晰度成像以及角度向高分辨率高清晰度成像开展工作。

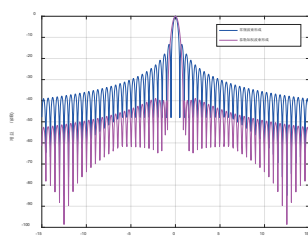
对于高频图像声呐而言，目标强度与背景噪声强度形成较高的对比度，高对比度的图像有利于目标的准确检测，图像的角度向高对比度，拟采用线性加权

降低波束域旁瓣,提高图像的波束域高对比度。常用的线性加权,主要包括汉明窗加权、可以自适应调节的泰勒窗加权和旁瓣水平一致的切比雪夫窗加权等,能够实现波束域低旁瓣,改善图像的对比图^[4]。



(a) 汉明窗加权波束比对

(b) 切比雪夫加权波束比对



(c) 泰勒加权波束比对

图3 线性加权波束图比对

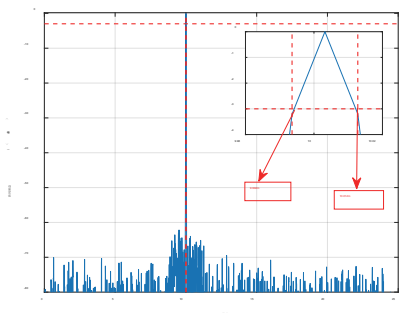
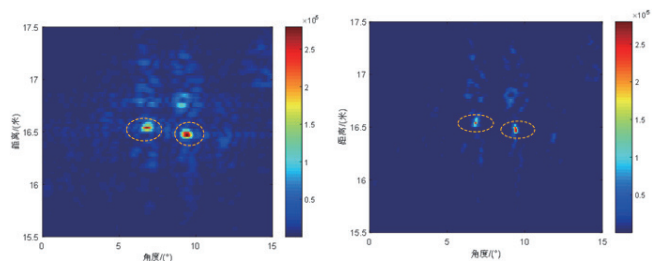


图4 距离向分辨率仿真结果

声图距离向分辨率为0.018m,则距离向分辨率满足2cm的指标要求。



(a) 常规方法

(b) 高分辨率高清晰度成像方法

图5 成像方法对比图

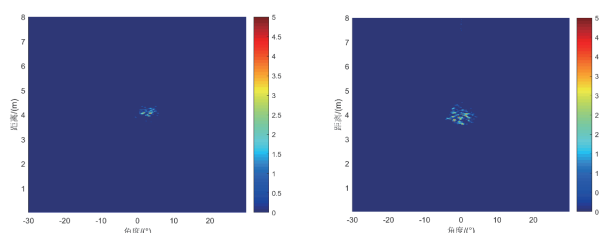
为了提高高频图像声纳的成像性能,接收换能器基阵由多个基元组成。同时应用波束形成技术,将多个基元构成的基阵形成预定方向的波束,抑制空间某些方位的信号,只让特定方位的信号通过。波束形成技术在阵列信号处理中起到了空间滤波器的作用。

在成像声纳中,利用波束域高分辨成像方法,不仅能够实现高分辨率成像的功能,而且能够实现低旁瓣成像的功能,大大地优化了系统成像的性能,并降低了信号处理算法的复杂度。

声图角度向分辨率约为0.2度,则角度向分辨率满足0.5度指标要求。

3 水池实验验证

在水池进行了管道微泄漏探测试验,所采用的消声水池长50m,宽15m,深10m。在消声水池,进行了侧视声纳距离分辨率和水平角度分辨率的测试。实验管段采用6寸钢管,实验压力为3MPa,实验泄放孔径分别为0.8mm,0.5mm。



(a) 3MPa, 0.5mm 孔

(b) 3MPa, 0.8mm 孔

图6 实验微泄漏图像

4 结束语

海底输气管道微泄漏检测装置能够用于海底输气管道泄漏的检测和定位,在实验水池环境对于0.8mm泄漏孔径,在10m距离能够进行清晰检测。实验室条件下,工况相对简单,数据分析处理简单,后续将开展海上测试,采用波束域动态门限和图像域边缘算法联合检测,以提高微泄漏检测算法的准确率,以满足指标单位时间内射流不小于0.5%(适用条件:有射流状态,管径10寸或12寸,压力3MPa)的情况,检测准确率 $\geq 85\%$ 的指标要求。

参考文献:

- [1] 成二辉,于银,海薛方.MS1000声纳在海底管道泄漏点检测中的应用[J].化工装备技术,2021,42(03):24-26.
- [2] 段江涛,王文琮,高正杨.某前视声纳试制过程中的高旁瓣现象的消除[J].电声技术,2019,43(01):60-63.
- [3] 乔鹏飞,邵成,覃月明.基于多波束前视声纳的水下静态目标的探测识别技术[J].数字海洋与水下攻防,2021,4(01):46-52.
- [4] 杨波,汪伟,刘烨瑶等前视扫描声纳成像径向误差分析和补偿[J].电子与信息学报,2021,43(03):796-802

作者简介:

王猛(1978-),男,汉,河北景县人,本科,工程师,研究方向:管道安全工程。